

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПРЕССИИ И НЕЯДЕРНОГО ПЕРЕГРЕВА ПАРА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СУПЕРСВЕРХКРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПАРА НА АЭС

Костарев В. С., Ширманов И. А., Щеклеин С. Е.

Уральский Федеральный Университет им. первого Президента России Б.

Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

slavakostarev@yandex.ru, topzar76123@gmail.com, s.e.shcheklein@urfu.ru

Аннотация. В настоящее время мировая теплоэнергетика уже начала переход на суперсверхкритические параметры пара, что позволяет увеличить КПД и снизить расход топлива, и, соответственно и сбросы вредных веществ в окружающую среду. В работе представлены результаты компьютерного моделирования вариантов тепловых схем АЭС с реакторами ВВЭР-1200, БН-1200 и БРЕСТ-ОД-300 с использованием огневого перегрева пара, а также паровой компрессии для получения суперсверхкритических параметров пара и проведена оценка эффективности использования данных тепловых схем.

Ключевые слова: тепловая схема АЭС, термодинамическая эффективность, суперсверхкритические параметры пара, ВВЭР-1200, БН-1200, БРЕСТ-ОД-300.

ON THE POSSIBILITY OF APPLICATION OF COMPRESSION AND NON-NUCLEAR STEAM SUPERHEATING FOR OBTAINING ULTRA-SUPERCRITICAL STEAM PARAMETERS AT NPPs

Kostarev V. S., Shirmanov I. A., Shcheklein S. E.

Ural Federal University Named After the First President of Russia B. N.

Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

Abstract. Today, the world fossil fuel industry has already begun the transition to super-supercritical steam parameters, which allows to increase efficiency and reduce fuel consumption, and the discharges of harmful substances into the environment. One way to improve the energy efficiency of nuclear power plants is to improve the thermodynamic cycle. The paper presents the results of computer simulation of thermal

schemes of nuclear power plants with VVER-1200, BN-1200, and BREST-OD-300 reactors a using steam superheating, as well as steam compression to obtain super supercritical parameters of steam and estimates the efficiency of using these thermal circuits.

Key words thermal circuit of nuclear power plants, thermodynamic efficiency, ultra-supercritical steam parameters, VVER-1200, BN-1200, BREST-OD-300.

На сегодняшний день атомные и тепловые электрические станции составляют большую часть энергетической системы России – 81,7% по состоянию на 2019 год [1]. В связи с этим, одной из приоритетных задач экономики страны является повышение энергоэффективности при использовании как ТЭС, так и АЭС.

Наряду с данными задачами рассматриваются так же многочисленные инновационные проекты, способные радикально повысить экологическую, энергетическую и экономическую эффективность атомной энергетики. К таким проектам относятся реакторы на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем (БН-600, БН-800, проектируемый БН-1200), а также реактор со свинцовым теплоносителем БРЕСТ-ОД-300, сооружаемый в настоящее время в г. Северске на площадке Сибирского химического комбината.

В данной работе представлены результаты моделирования различных вариантов тепловых схем реакторов ВВЭР-1200, БН-1200, БРЕСТ-ОД-300 (стандартный цикл, стандартный цикл с начальным огневым перегревом пара, цикл с компрессией и одноступенчатым промежуточным огневым перегревом пара, цикл с компрессией и двуступенчатым промежуточным огневым перегревом пара, цикл с компрессией, начальным и одноступенчатым промежуточным огневым перегревом пара цикл с компрессией, начальным и двуступенчатым промежуточным огневым перегревом пара) при помощи САПР United Cycle. Целью работы является определение наиболее эффективного варианта модификации тепловой схемы АЭС с БН-1200 (применение компрессии и неядерного огневого перегрева пара для поручения суперсверхкритических параметров пара) с термодинамической точки зрения.

Современный уровень развития энергетического машиностроения, благодаря которому стало возможно создание высокотемпературных паровых турбин, рассчитанных на суперсверхкритические параметры пара ($P=30$ МПа, $t=650^{\circ}\text{C}$), и паровых компрессоров, сделал возможным широкое применение в теплоэнергетике циклов на подобных параметрах пара.

Это позволяет рассматривать возможность достижения высоких параметров пара на АЭС с реакторами на тепловых нейтронах без превышения пределов допустимых условий эксплуатации тепловыделяющих элементов с оболочками из сплавов циркония с помощью компрессии и перегрева насыщенного пара газовым топливом. На АЭС с РБН благодаря компрессии и дополнительному перегреву пара можно получить еще более высокие параметры, чем на сегодняшний день, и, следовательно, увеличить термодинамическую эффективность АЭС [2].

Для решения задач моделирования тепловых схем АЭС авторами использовался программный пакет САПР United Cycle, предназначенный для решения задач и определения наилучшей структуры и состава оборудования теплоэнергетического объекта и расчета стационарных эксплуатационных режимов работы.

В САПР United Cycle затем были построены несколько потенциально возможных вариантов тепловых схем для их дальнейшего расчета. Рассматривались следующие варианты:

- тепловая схема реакторной установки со стандартными параметрами);
- тепловая схема РУ со стандартными параметрами и начальным огневым перегревом пара (до 650 °С);
- схема с компрессией (до 30 МПа) и одним промежуточным перегревом пара (до 650 °С);
- схема с компрессией, (до 30 МПа) начальным и двумя промежуточными перегревами пара (до 650 °С).

Для реактора ВВЭР-1200 по причине понижения начальных параметров были также рассчитаны два дополнительных варианта:

- схема с компрессией (до 30 МПа), начальным и одним промежуточным огневым перегревом пара (до 650 °С);
- схема с компрессией (до 30 МПа) и двумя промежуточными перегревами пара (до 650 °С).

Результаты показали, что при понижении начальных параметров термодинамического цикла ВВЭР-1200 до $t=250$ °С, $P=3,98$ МПа с последующим сжатием до 30 МПа и огневым перегревом до 650°С электрическая мощность увеличится на 50%, КПД нетто увеличится на 20%, а глубина выгорания топлива увеличится на 3% по сравнению со стандартным циклом установки, что позволяет повысить термодинамическую эффективность цикла и увеличить продолжительность топливной кампании.

При применении начального огневого перегрева пара на стандартных параметрах ВВЭР-1200 также отмечается повышение электрической мощности так и КПД нетто установки, но его значение оказывается все же ниже, чем у схемы, предложенной авторами.

Можно сделать вывод, что понижение начальных параметров пара на легководных АЭС является оправданным мероприятием, поскольку позволяет уменьшить давление в корпусе реактора и повысить глубину выгорания топлива.

При применении в тепловой схеме реактора БН-1200 компрессии пара и его последующего промежуточного неядерного (огневого) перегрева после ЦВД электрическая мощность установки увеличится на 50%, а КПД нетто увеличится на 5% по сравнению со стандартным циклом установки, что также приводит к значительному повышению термодинамической эффективности цикла.

Аналогично, при применении в тепловой схеме реактора БРЕСТ-ОД-300 компрессии и огневого перегрева пара электрическая мощность установки увеличится на 24,84%, а КПД нетто увеличится 3,82% по сравнению со стандартным циклом установки.

Таким образом, что применение компрессии и неядерного (огневого) перегрева пара для получения супер-сверхкритических параметров на АЭС с рассматриваемыми типами реакторов позволяет значительно повысить электрическую мощность, вырабатываемую АЭС, а также коэффициент полезного действия. Дальнейшее совершенствование термодинамического цикла легководных АЭС является весьма эффективным с термодинамической точки зрения.

Библиографический список

1. Отчет о функционировании ЕЭС России в 2019 году // Акционерное общество «Системный оператор Единой энергетической системы». – 2019.
2. Перспективы использования парогазовых технологий в энергоблоках атомных электростанций / Касилов В. Ф., Низовой А. В.. // ИНаучные исследования: от теории к практике. – 2015. – №4 (5) – с. 34-38
3. Щепетина Т.Д. О повышении КПД энергоблоков с водо водяными реакторами (ВВР) // Энергия: экономика, техника, экология. – 2010/ – №12 – с. 21-29
4. Атомные электростанции с реакторами на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем: учебное пособие. В 2 ч. Ч. 1 / А.И. Бельтюков, А.И. Карпенко, С.А. Полуяктов, О.Л. Ташлыков, Г.П. Титов, А.М. Тучков, С.Е.

Щеклеин; под общ. ред. С.Е.Щеклеина, О.Л. Ташлыкова. – Екатеринбург: УрФУ, 2013. – 548 с.

5. Влияние температурных характеристик на глубину выгорания ядерного топлива / Щеклеин С. Е., Титов Г. П., Борисова Е. В. // Вестник Одесского политехнического университета. – 2011. – №2 (36) – с. 104-108

6. United Cycle. Руководство пользователя